

# MISKOLCI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



## **Valós idejű ipari Ethernet rendszerek kritikus idő meghatározási módszereinek kidolgozása**

című

PhD értekezés tézisei

Készítette:

**Ferenczi István**

okleveles villamosmérnök

**Hatvany József Informatikai Tudományok**

**Doktori Iskola**

Iskolavezető:

**Dr. Szigeti Jenő**

egyetemi tanár

Témavezető:

**Dr. Vásárhelyi József**

egyetemi docens

Miskolc

2016

## **A Bíráló bizottság tagjai**

### *Elnök:*

**Prof. Dr. Juhász Imre** Miskolci Egyetem, egyetemi tanár

### *Titkár és tag:*

**Dr. Tóth Lajos Tibor** Miskolci Egyetem, egyetemi docens

### *Tagok:*

**Dr. Czap László** Miskolci Egyetem, egyetemi docens

**Dr. Jónap Károly** AFKI, nyugdíjas tudományos  
főmunkatárs

**Dr. Györök György** Óbudai Egyetem, egyetemi docens

### *Hivatalos bírálók:*

**Dr. Haller Piroska** Petru Maior Egyetem, egyetemi  
docens

**Dr. Blága Csaba** Miskolci Egyetem, egyetemi docens

## TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS .....	5
I. A DISSZERTÁCIÓ CÉLJA ÉS SZÜKSÉGESSÉGE, A KITŰZÖTT KUTATÁSI FELADAT ISMERTETÉSE .....	5
II. A FONTOSABB SZAKIRODALOMI FORRÁSOK RÖVID ÁTTEKINTÉSE, KUTATÁSI MÓDSZEREK.....	7
III. ÚJ, TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK .....	8
1. Tézis [S4, S9, S17, S18] .....	8
2. Tézis [S11, S13, S17, S18] .....	10
3. Tézis [S1, S2, S3, S12, S14, S19] .....	12
4. Tézis [S5, S7, S8, S15, S20, S21] .....	14
IV. THEZIS SUMMARY .....	16
IV. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK.....	19



## **BEVEZETÉS**

Ahogy a jelenkori társadalom szereplői sem elszigetelt módon végzik tevékenységüket, úgy a korszerű ipari irányító rendszerek is igénylik a közöttük lévő kommunikációs kapcsolatok kialakítását. Ezek a kapcsolatok hálózatokba rendeződnek és mindegyik elemének jól meghatározott szerep tulajdonítható. A XX. század utolsó évtizedeinek kétségtelenül egyik meghatározó tényezője volt a számítógépes hálózatok megjelenése. A világháló rövid időn belül az információszerzés és az információáramlás egyik legnépszerűbb forrásává vált. Segítségével a kommunikációs folyamatok kiléptek a pont-pont kapcsolatok korlátai mögül és lehetővé vált olyan stratégiák kialakítása, amelyek egyszerre, látszólag azonos időben akár több hálózati szereplő között is képesek az információáramlást biztosítani.

### **I. A DISSZERTÁCIÓ CÉLJA ÉS SZÜKSÉGESSÉGE, A KITÜZÖTT KUTATÁSI FELADAT ISMERTETÉSE**

A számítógépes hálózatok gyors ütemben történő elterjedése hozzájárult a hálózati eszközök és az üzemeltetésükhöz szükséges költségek jelentős csökkenéséhez. Ez a tény egyre inkább az ipari kommunikációs rendszerek fejlesztőit is az Ethernet hálózat irányába terelte. A vezető ipari irányítóberendezéseket gyártó vállalkozásokon belül kutatócsoportok alakultak, hogy kidolgozzák azokat a módszereket, amelyek segítségével a valós idejű adatkommunikáció maradéktalanul megvalósítható. Ezeknek a kutatócsoportoknak a működése meglehetősen zártkörű. Publikációs tevékenységük

korlátozott, inkább csak elvi megoldásokat, vagy már a kész termékeket hozzák nyilvánosságra, de a módszerekről csak nagyon ritkán közölnek információt. Ilyen körülmények között nem csoda, hogy nemcsak a magyar, de a nemzetközi szakirodalom is meglehetősen korlátozott ezen a területen. Témavezetőm dr. Ajtonyi István professzor úr javaslatára – aki időközben sajnos elhunyt – azért választottam ezt a tématerületet, hogy átfogó képet alkothassak a valós idejű ipari Ethernet rendszerekkel kapcsolatos alapvető kritériumokról.

Az ipari irányítóberendezések közötti kommunikációs kapcsolat alapfeltétele egy korszerű, biztonságos, decentralizált folyamatirányító rendszer kialakításának. A technológia közelébe telepített ipari vezérlők egy-egy részfolyamat közvetlen irányítását látják el. Az innen érkező adatokat továbbítani kell a rendszer adatbázisába, hogy feldolgozható, kiértékelhető esetleg megjeleníthető vagy archiválható legyen. A 70-es évektől kezdődően a vezérlési feladatokat egyre inkább a programozható logikai vezérlők (PLC) látják el. A mikroprocesszorok szinte minden területet átfogó elterjedése, az analóg jeltovábbítást felváltó, egyre több információt hordozó digitális jelközlés lehetővé tette az új irányítási megoldások használatát. Az intelligens távadók és beavatkozók megjelenésével az adatfeldolgozás osztott jellege kiszélesedik. Ezek a készülékek csak villamos segédenergiával működnek, digitális jelekkel dolgoznak és a hozzájuk tartozó irányítórendszerrel akár kétirányú kommunikációra is képesek. Az erőforrások megosztása miatt a kommunikációt biztosító buszrendszerek szerepe egyre jobban felértékelődik. A megnövekedett adatmennyiség továbbítására a klasszikus ipari kommunikációs buszok már nem alkalmasak. Az Ethernet hálózat sávszélessége valamint az igen magas adattovábbítási sebesség bizonyos szabályok bevezetése mellett lehetőséget biztosíthat az ipari irányítórendszerek adatforgalmának bonyolítására is.

A disszertáció célja tehát kidolgozni mindazokat a kritikus idő meghatározási módszereket, amelyek segítségével biztosítható az ipari Ethernet rendszerek valós idejű működése az ipari irányítás minden területén, a számítógépes folyamatirányítástól kezdve a motorvezérlésekig. A kidolgozott módszerek igazolása konkrét

gyakorlati mérésekkel vagy számítógépes modell segítségével történik.

## **II. A FONTOSABB SZAKIRODALOMI FORRÁSOK RÖVID ÁTTEKINTÉSE, KUTATÁSI MÓDSZEREK**

Az ipari Ethernettel kapcsolatos magyar nyelvű szakirodalom meglehetősen szegényes ezen a területen. Míg az informatika, a számítógépes hálózatok és az internet világából számos színvonalas magyar nyelvű könyv, folyóirat, internetes kiadvány létezik [2, 4, 10, 11, 12], addig az ipari Ethernettel kapcsolatosan egyedül csak az Ajtonyi professzor úr köteteiből [3, 14, 27, 52] sikerült használható ismereteket találni.

Az idegen nyelvű szakirodalom az internetnek köszönhetően már sokkal gazdagabb választási lehetőséget biztosít. Megemlítenék néhány elismert szerzőt, akiknek a munkái nagyban hozzájárultak a disszertációm tudásbázisának megalapozásához. Itt emelném ki Raimond Pigan és Mark Metter *Automating with Profinet* című könyvét [36], amelyben részletesen leírják a Profinet rendszer működési alapjait, protokolljait és alkalmazási területeit. De számos hasznos megoldást ismertem meg az EtherCAT rendszerrel kapcsolatosan Martin Rostan a Beckhoff Automation cég vezetőjének kiadványaiból is [32, 39, 40, 41]. Sokat segített Perry Marshall, és John Rinaldi professzor urak könyve is [9], amely röviden, tömören csak a lényeges szempontokat kiemelve mutatja be a valós idejű Ethernet rendszerek sarkalatos problémáit.

A szigorúan valós idejű rendszerek tanulmányozását megalapozó publikációk közül megemlíteném még Jürgen Jaspersen professzor úr és Gunnar Prytz munkáit [57, 58], amelyek a negyedik tézisem alapját képezték.

Kutatásaim során saját fejlesztésű mérési módszereket dolgoztam ki. Ezek az eljárások konfigurálhatóak különböző vezérlési szituációknak megfelelően. A mérések a paraméterek beállítása után gyakorlatilag automatikusan történnek. A mérési minták száma előre meghatározható, az eredmények pedig automatikusan tárolódnak. A mérési ciklus lezárása után a fontosabb

jellemzők azonnal megjelenítésre kerülnek. Az eredmények akár Excel táblázatba is konvertálható, így további statisztikai elemzéseire is lehetőség nyílik.

### III. ÚJ, TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A disszertáció négy tézisre épül. Az első tézisben elemeztem az osztott intelligenciájú ipari irányítórendszerek valós idejű működési feltételeit. Továbbá meghatároztam egy valós idejű alaprendszert és az itt megállapított kritériumokat kiterjesztettem a programozható logikai vezérlőkre. Ugyancsak itt történt a master-slave vagy a provider-consumer elven működő ipari Ethernet alrendszerek valós idejű viselkedési feltételeinek elvi meghatározása is [S4, S9].

#### 1. Tézis [S4, S9, S17, S18]

*Kidolgoztam egy olyan elméleti modellt, amelynek segítségével meghatározható, hogy a ciklikus működésű ipari Ethernet rendszerek milyen kritériumoknak kell eleget tegernek, hogy valósidejű működést biztosítsanak.*

Mivel az alrendszer válaszideje egyértelműen függ a ciklusidőtől, az előbbi kijelentést úgy is értelmezhetjük, hogy az alrendszer valós idejűnek tekinthető, ha bármely bemeneti gerjesztésre adott válaszidő sohasem haladja meg a technológia által előírt határidőt.

Ha figyelembe vesszük az alrendszeren futó vezérlési alprogramok időkritikus futási követelményeit is és ezek mindegyikéhez hozzárendelve egy-egy elemi határidőt, akkor általános formában, teljes bizonyossággal kijelenthető:

**1.1. Altézis.** *A ciklikusan működő alaprendszer valós idejű, ha a határidős taszkok futási az előírt határidőn belül van, a maximális ciklusidő pedig a rendszer specifikációjában megadott technológiai időkorlát felénél nem nagyobb.*



Megállapítást nyert az a tény, hogy a programozható logikai vezérlők minden szempontból eleget tesznek egy valós idejű alaprendszer követelményeinek, vagyis alaprendszerként használhatók az osztott intelligenciájú DCS rendszereknél.

A továbbiakban az alaprendszert kiterjesztettem alrendszerre úgy, hogy Ethernet hálózaton keresztül további IO csatornával rendelkező elemeket csatlakoztattam hozzá. Az alrendszerre vonatkozóan is meghatároztam a valós idejű működési kritériumokat, amelyek szerint:

**1.2. Altézis.** *Az ipari Ethernet alrendszer valós idejű, hogyha a legnagyobb ciklusidővel rendelkező eszköz buszfrissítési periódusa legalább négyszer kisebb, mint a rendszer specifikációjában hozzárendelt időkorlát.*

Az előbbi feltételeket teljesítve az is kijelenthető, hogy:

**1.3. Altézis.** *Az ipari Ethernet alrendszer akár egységes egészként működő valós idejű alaprendszernek tekinthető annak ellenére, hogy a bemeneti és kimeneti változók más és más, egymással Ethernetes kapcsolatban álló IO eszközökhöz tartoznak [S17, S18].*

**1.4. Altézis.** *Két vagy több alaprendszer Etherneten történő összekapcsolásából származó rendszer ugyancsak valós idejű működést biztosít, ha a legnagyobb ciklusidővel rendelkező eszköz buszfrissítési periódusa legalább hétszer kisebb, mint a teljes rendszerre meghatározott időkorlát.*

A második tézis az IO kontrollerek ciklusidő-változásainak meghatározását, mérési módszereit és mérésekkel történő igazolását tartalmazza. A ciklikus működést meghatározó legfontosabb jellemző a controller ciklusideje. Ennek mérési módszerei kerülnek bemutatásra, valamint a mérési eredmények kiértékeléséből származó általános következtetések felhasználása a valós idejű rendszerek tervezésénél.

A ciklusszámláláson alapuló közvetett módszer bármilyen PLC-nél alkalmazható, hiszen nem igényel semmilyen külső

berendezést. Segítségével nyomon követhető a ciklusidő változás, a mért értékek felhasználhatóak a reakcióidők kiszámításakor, amelyek a valós idejű működés kritériumait határozzák meg [S11].

A második módszer közvetlen mérési lehetőséget biztosít külső időmérő számára. Csak olyan PLC-knél használható, amelyek rendelkeznek elektronikus kimeneti csatornával is. Elsősorban hasonló területen történő kutatási célokra használható. Sokkal érzékenyebb az előzőnél és akár néhány mikroszekundumos változások is mérhetőek. A mérési eredmények korlátlan mennyiségben, tetszés szerint tárolhatóak. A módszer segítségével sikerült mérnem a ciklushibát. Ennek alapján meghatároztam a ciklushibára vonatkozó relációt, valamint a ciklushiba és a vezérlési program futási ideje közötti kapcsolatot [S13].

Ugyancsak ezzel a módszerrel vizsgáltam a kommunikációs terhelés hatását különböző konfigurációs beállítások mellett és megállapítottam, hogy ha nincsenek kommunikációs igények, a ciklusidő nem változik, bármekkora is legyen a beállított érték. A konfiguráció során beállított érték ciklusidő korlátot jelent a kommunikációs igénybevétel során, amelyet a vezérlő igyekszik több-kevesebb sikerrel betartani. Ugyanitt határoztam meg a kommunikáció szempontjából optimálisnak tekinthető kommunikációs terhelés értékét is [S17, S18]

## **2. Tézis [S11, S13, S17, S18]**

***Kidolgoztam két olyan új ciklusidő mérési eljárást, amelyeknek segítségével, sokkal pontosabban mérhetőek az IO kontrollerek vagy PLC-k ciklusidői, mint a rendszerszoftverek által mért értékek.***

A mérési eredmények egyértelműen alátámasztották a következőket:

- 2.1. *Altézis.*** *Megállapítottam, hogy a programozható logikai vezérlők, valamint a valós idejű ipari Ethernet alaprendszerek ciklusideje függ az utasítások számától, azok bonyolultságától és típusától, a megszakításoktól valamint a vezérlő processzorának sebességétől.*

- 2.2. Altézis.** *A ciklushiba egyre kevésbé meghatározó a felhasználói program futási idejének növekedésével, vagyis minél nagyobb a ciklusidő annál kevésbé érzékelhető a hardverműködés okozta pontatlanság.*
- 2.3. Altézis.** *Kommunikációs igények hiányában a ciklusidő nem növekszik, bármekkora is legyen a kommunikációs terhelés beállítási értéke Kísérleti eredményekkel igazoltam az előző tézisben megfogalmazott és kidolgozott valós idejű alrendszerre vonatkozó megállapítást, miszerint az egységes egészként viselkedik, úgy mintha az Ethernet hálózaton keresztül kapcsolódó IO modulok saját közvetlen elemei lennének.*

A harmadik tézisben a nem szinkronizált ipari Ethernet rendszerek reakcióidejének vizsgálatát helyeztem előtérbe. Egy valós idejű rendszer egyik legfontosabb követelménye, hogy a reakcióidő a technológia által támasztott határidőkön belül legyen. A nem szinkronizált ipari Ethernet rendszerek valós idejű működésének alapvető meghatározója a reakcióidő. Ennek pontos elméleti meghatározása nem lehetséges, ugyanis az eszközezőrlők bemeneti csatornáit gerjesztő jelek véletlenszerűen érkeznek a ciklikusan beállított frissítési időhöz képest. Érdemes viszont a szélső értékeket, főleg a lehetséges maximális értéket meghatározni, azért hogy a valós idejű működést meghatározó időkorlát rögzíthető legyen. Vagy ahogy az a gyakorlatban lenni szokott, adott technológiai időkorláthoz kell igazítani a reakcióidőket. Ennek érdekében meghatároztam az elméletileg lehetséges minimális és maximális reakcióidőket, a maximális jittert, és a relatív eltérést [S3, S14, S19]. A reakcióidők ismeretének függvényében meghatároztam a nem szinkronizált valós idejű Ethernet rendszerek korlátait, paramétereinek beállítási lehetőségeit, amelyek segítségével optimális működést biztosíthatunk a különböző sebességű folyamatok számára.

A mérések, az eredmények rögzítése, valamint a jellemző értékek kiszámítása egy LabView 8.2 alkalmazás és egy NI USB6221 mérőinterfészsel történik teljesen automatikusan [S2]. A

mérési pontosság  $0,05 \mu\text{s}$ . A mérések során igyekeztem minden meghatározó szituációt figyelembe venni.

Az ipari környezetben működő irányító rendszerek egyik fontos követelménye a biztonságos működés, többek között az, hogy érzéketlen legyen a környezeti villamos zajokra. Ennek érdekében konfigurálhatók a bemeneti csatornák késleltetési ideje. Erre vonatkozóan meghatároztam a bemeneti jel időtartamára vonatkozó kritériumot is [S1].

### 3. Tézis [S1, S2, S3, S12, S14, S19]

***Kidolgoztam egy új, automatikusan működő mérési eljárást, amelynek segítségével mérhető a reakcióidő. Megállapítottam, hogy a nem szinkronizált ipari Ethernet rendszer bármely eszközevélőhöz tartozó kimeneti csatornák reakcióideje a kontroller bemeneti késleltetéssel bővített minimális ciklusideje és a konfigurációban meghatározott frissítési idő négyszerese között véletlenszerűen változik.***

- 3.1. ***Altézis.*** Egyirányú kommunikáció esetén, ha a bemeneti paraméterek azonosak, a válaszidők nagysága nem függ attól, hogy melyik eszköz (a kontroller vagy az eszközevélő) tölti be az termelő, illetve a fogyasztó szerepét.
- 3.2. ***Altézis.*** Kétirányú kommunikációnál a válaszidők változásának elemzése során bizonyos periodicitás figyelhető meg, amely arányos a frissítési idővel. Ha a bementi jelek frekvenciáját állandó értéken tartjuk, akkor ebből a változásból meghatározható a szinkronizálás hiányában fellépő, a két eszköz közötti frissítési idők egymáshoz viszonyított csúszása.
- 3.3. ***Altézis.*** Az azonosan konfigurált távoli IO eszközevélők bemeneti és kimeneti csatornái a válaszidők szempontjából úgy viselkednek, mintha ugyanahhoz az eszközevélőhöz tartoznának.

**3.4 Altézis.** *A bemeneti jel érzékelése akkor biztonságos, ha a csatornagerjesztés időtartama nagyobb, mint a frissítési idő és a csatornakésleltetési idő összege.*

A negyedik tézisben a szigorúan valós idejű ipari Ethernet rendszerek optimális buszfrissítési ciklusának meghatározását vizsgáltam. Itt főleg a csomópontok száma, a vezérlési adatok mennyisége, valamint a bitsebesség szerinti szempontokat elemeztem. Az itt meghatározott szabályokat felhasználva kidolgoztam egy olyan számítógépes modellt, amely segítségével vizsgálhatóak ezek a rendszerek a fentebb említett szempontok szerint különböző szituációkban. Alapvetően két élvi megoldás kivitelezhető. Az egyik az, amikor a kontroller a vezérlési adatokat külön-külön címzett keretekben továbbítja az eszközvezérlőkhöz. A másik módszer igyekszik kihasználni a maximális Ethernet keretterhelést és minél több vezérlési telegramot elhelyezni egy keretben.

A szigorúan valós idejű kommunikációs követelményeknek minden szempontból eleget tevő, sok csomópontot tartalmazó tesztrendszer kiépítése meglehetősen időigényes és költséges feladat. Ennek érdekében megterveztem és kifejlesztettem egy olyan számítógépes modellt, amelynek segítségével mindkét, elviekben teljesen különböző technikai megoldás vizsgálható gyakorlatilag bármilyen szituációban. Az alkalmazás segítségével könnyen eldönthető, hogy adott technológiai követelményekhez milyen megoldást célszerű tervezni. [S7, S8].

A gyakorlatban a legtöbb szigorúan valós idejű ipari Ethernet rendszer több eszközvezérlőt, de viszonylag kis mennyiségű (16, 32 bájtt) vezérlési adatokat használ. Az ilyen rendszereket feltételező elemzések egyértelműen alátámasztják azt a feltevést, hogy Fast Ethernet hálózatban az optimális ciklusidőt a beágyazott telegramokat alkalmazó megoldás biztosítja. [S5, S15].

Hátrány viszont, hogy ha nem biztosított az állandó keretterhelés a ciklusidő sem lesz állandó. Ha az a cél, hogy alacsony de változó keretterhelés mellett állandó ciklusidőt kapjunk, akkor a másik megoldást célszerű alkalmazni.

A Gigabit Ethernet hálózatban elvégzett elemzések alapján megállapítottam, hogy azonos körülmények között a két rendszer teljesen eltérő módon viselkedik. A ciklusidő függővé válik a szegmensek hosszától. Míg a beágyazott telegramokat tartalmazó kerettovábbításnál jelentősen növekszik a ciklusidő, addig a külön-külön címzett kereteket alkalmazó megoldásnál az optimális keretterhelésen túl szinte alig tapasztalható növekedés a szegmenshosszt illetően. Ez utóbbi esetben viszont a szegmenshosszal arányosan növekszik az optimális keretterhelés [S21].

#### **4. Tézis [S5, S7, S8, S15, S20, S21]**

***Megterveztem és kifejlesztettem egy olyan új számítógépes alkalmazást, amely mindkét alapszámítás esetében képes meghatározni az optimális buszfrissítési időt a csomópontok számától, a keretterheléstől és a sebességtől függően.***

**4.1. Altézis.** *Fast Ethernet hálózatban az alacsony keretterhelést igénylő, sokcsomópontos, szigorúan valós idejű ipari Ethernet rendszereknél az optimális ciklusidőt a beágyazott telegramokat alkalmazó megoldás biztosítja.*

**4.2. Altézis.** *Fast Ethernet hálózatban a csomópontonként külön-külön címzett keretekben elhelyezett, 36 bájtól nem nagyobb, de változó keretterhelést feltételező vezérlési adatok továbbítása állandó ciklusidőt biztosít.*

**4.3. Altézis.** *A buszon történő ütközések elkerülésére vonatkozó szabályokat figyelembe véve meghatároztam, hogy Gigabit Ethernetes hálózatban 84 bájtól optimális keretterhelés mellett, 100 méteres szegmenseket használva legalább 5 csomópontot tartalmaznia kell a Profinet IRT típusú rendszereknek. A beágyazott telegramokat tartalmazó rendszereknél a legalább 512 bájtos keretméret biztosítása a csomópontok számától, illetve telegrammérettől függ.*

Az értekezésemben bemutatott módszerek jelentős része konkrét gyakorlati mérési eredményekkel van alátámasztva és igazolva. Több éves munkám eredményeként, a több tucat lehetséges szituációk szerinti közel százezer mérési eredmény kiértékelésén alapuló megállapítások reményeim szerint segítséget nyújtanak a területen dolgozó fejlesztő és üzemeltető mérnökök számára, akik nap, mint nap igyekeznek minél jobb, üzembiztosabb és olcsóbb ipari kommunikációs eszközöket készíteni vagy ezeket üzemeltetni.

Ugyancsak a valós idejű ipari Ethernet rendszerek tervezését segítheti az általam kidolgozott Profinet IRT és EtherCAT rendszerek számítógépes szimulációs modellje. Ennek segítségével bármilyen bonyolultságú lineáris buszrendszerű, sok csomópontos, szigorúan valós idejű hálózat vizsgálható virtuális körülmények között. Segítségével meghatározhatók mindazok a kritikus paraméterek, amelyeket a tervezéskor figyelembe kell venni.

#### IV. THEZIS SUMMARY

The following four dissertation theses sum up the research results of and experience achieved during my several years of work:

**Thesis 1:** *I have defined a cyclical real-time operating system base which can be declared to be real time if the worst-case cycle time (the maximum cycle time) is not more than half of the technological limit. Since the subsystem response time is clearly dependent on the cycle time, the above statement can be interpreted that the base system can be considered real-time if any excitation input response time will never exceed the time limit prescribed by the technology.*

*Furthermore, I extended the core system by connecting more items via Ethernet IO channels. I also determined the real-time performance criteria of the subsystem according to which the Ethernet subsystem is to be stated real time if the bus update time of the device with the largest cycle time is at least four times less than the assigned time limit in the system specification.*

**Thesis 2:** *I developed two methods that help to measure the cycle time more accurately than measurements provided by the control system software.*

*The indirect method based on cycle count can be applied to any PLC as it does not require any external equipment. It makes it possible to track changes in cycle time. The measured values can be used in the calculation of the reaction times, which define the criteria for real-time operation.*

*The second method provides a direct measurement option for an external timer. Only such PLC can be used which also have an electronic output channels. Primarily it can be used for research purposes in a similar area. It is much more sensitive than the previous one, and even a few microseconds changes can be measured. The measurement*



results can be stored in unlimited quantities. Using this method I was able to measure the cycle of failure. I determined the relation of the cycle for the error and the relationship between the cycle and run-time error in the control program.

**Thesis 3:** *The basic determinant of the real-time operation of the non-synchronized industrial Ethernet systems is the reaction time. The exact theoretical definition of the reaction time is not possible because the excitation signals running into the input channels of the device drivers arrive at random with respect to the cyclically adjusted refresh time. It is, however, useful to determine the extreme values, especially the maximum possible values in order to record the time limit for real-time operation. I determined the limits of the non-synchronized real-time Ethernet systems based on their known reaction times and the configuration options of their parameters, which help to ensure the optimum operation of variable speed processes. Or, as is usually the case in practice, the time limit is adjusted to the given technological response times. I determined the theoretical minimum and maximum response time, the maximum jitter and the relative deviation. After processing thousands of measurements in different situations, I found that the output channel response time related to the non-synchronized industrial Ethernet system device drivers varies randomly between the minimal cycle time of the input delay extended controller and the four-fold value of the refresh time specified in the configuration.*

**Thesis 4:** *In this thesis, I examined the definition of the optimal bus refresh cycle time in strictly real-time industrial Ethernet networks. In this contribution, I focused on the number of nodes, the amount of control data, as well as aspects of the bit rate. Using the rules set forth herein I developed a computer model using which these systems can be examined considering the various aspects mentioned*

*above and in different situations. There are basically two theoretical solutions feasible. One is when the controller transmits control data to the device controllers in separately addressed frameworks. The other method is trying to exploit the maximum Ethernet frame load and to place more control telegrams within one frame.*

*I have designed and developed a computer model that allows both completely separate strictly real-time technology solutions to be tested practically in any situation. The application makes it easy to decide what solution should be designed based on the given technological requirements.*

*I found that a solution applying embedded telegrams is the one providing the most optimal cycle time in the case of strictly real-time Industrial Ethernet systems, requiring low payload, and multiple nodes in a Fast Ethernet network. Also, I concluded that forwarding control data that is stored in separately addressed data frames in each node and presupposes changing frame loads that do not exceed 36 bytes, results in constant cycles.*

#### IV. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

##### **Lektorált idegen nyelvű folyóiratszövegek:**

- [S1] Ferenczi István: *Relationship between input channel excitation time and Profinet IO refresh time*, HUNGARIAN JOURNAL OF INDUSTRY AND CHEMISTRY 38:(2) pp. 95-98. 2010, ISBN 0133-0276
- [S2] Ferenczi István: *Measuring an Industrial Ethernet IO Device Reaction Time by LabView 8.2*, Scientific Bulletin Series C: Fascicule Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 2013, Vol. 27, pp. 101-104.
- [S3] Ferenczi István, Vásárhelyi József: *A Methode to Measuring and Analyzing the Reaction Time of an Industrial Ethernet Network*, Journal of Electrical Engineering, ISSN: 1582-4594, Vol. 16/1, pp. 132-137, 2016.

##### **Lektorált magyar nyelvű folyóiratszövegek:**

- [S4] Ferenczi István: *Profinet Real-Time kommunikációs stratégiák*, GÉP, Vol. 60/12. pp. 53-56., 2009.
- [S5] Ferenczi István: *Beágyazott telegramokat tartalmazó ipari Ethernet keretek ciklusideje*, GÉP, Vol. 63/5, pp. 51-54. 2012.

##### **Külföldi konferencia kiadványban megjelent cikkek:**

- [S6] Ferenczi István: *PROFINET - több mint ipari Ethernet II.*, X. ENELKO - XIX. SzámOkt. Nemzetközi Energetika - Elektrotechnika és Számítástechnika Konferencia, Marosvásárhely, 2009. október 8-11, 2009, pp. 197-202. ISSN 1842-4546.
- [S7] Ferenczi István: *Szinkronizált adatátviteli késleltetések elemzése a Profinet IRT rendszerénél*, XI. ENELKO – XX SzámOkt Nemzetközi Energetikai-elektrotechnikai és Számítástechnikai Konferencia, Szatmárnémeti, Románia, 2010.október 7-10, pp. 118-123. ISSN 1842-4546

- [S8] Ferenczi István: *Comparing a two approaches of Hard Real-Time Industrial Ethernet protocols*, Proceedings of the 1st Regional Conference – Mechatronics in Practice and Education (MECH-CONF 2011), December 8-10, 2011 Subotica, Serbia, ISBN 978-86-85409-67-7

**Hazai konferencia kiadványban megjelent cikkek:**

- [S9] Ferenczi István: *Korszerű valós idejű ipari Ethernet rendszerek*, II. Nyíregyházi Doktorandusz (PhD/DLA) Konferencia, Nyíregyháza, Magyarország, 2008.11.21 Bessenyei György Könyvkiadó, 2009. pp. 241-248. ISBN:978-963-9909-19-9.
- [S10] Ferenczi István: *PROFINET - több mint ipari Ethernet*, microCAD 2009, XXIII. International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország, 2009.03.19-2009.03.20. Automation and Telecommunication Section, pp. 21-26. ISBN:978-963-661-874-2
- [S11] Ferenczi István: *Profinet IO ciklusidő változás vizsgálata*, III. Nyíregyházi Doktorandusz (PhD/DLA) Konferencia. 2009. november 20., Nyíregyháza, Magyarország, pp. 121-126. ISBN 978-963-87809-6-6.
- [S12] Ferenczi István: *Válaszidők vizsgálata egy Profinet IO rendszerénél*, Proceedings of Factory Automation 2010: 15-16th April, 2010, Kecskemét, Hungary. pp. 105-110. ISBN:978-963-7294-83-9.
- [S13] Ferenczi István: *Profinet IO controller ciklusidő változásának vizsgálata*, XXV. MicroCAD Nemzetközi Konferencia kiadvány, 2010 március.
- [S14] Ferenczi István: *Profinet IO válaszidők elemzése*, MTEAR 2010 Konferencia. Nyíregyháza, Magyarország, 2010.05.18-2010.05.19. pp. 169-174. ISBN:978 963 706 424 1.

- [S15] Ferenczi István: Methods to determine a Profinet IRT bus cycle time, Proceedings of the XXV. microCAD International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország, 2011.03.31-2011.04.01. Miskolci Egyetem, pp. 7-12. ISBN 978-963-661-691-9.
- [S16] Ferenczi István: *PTC protokoll alkalmazása a Profinet IRT kapcsolatok szinkronizálására*, IV. Nyíregyházi Doktorandusz (Phd/DLA) Konferencia Nyíregyháza, Magyarország, 2010.12.07. ISBN:978-963-318-174-4.
- [S17] Ferenczi István: *Programmable Logic Controllers as Real-Time Industrial Ethernet Base System Devices*, International Symposium on Applied Informatics and Related Areas: AIS 2013, Óbudai Egyetem Székesfehérvár, Magyarország, 2013.11.07-2013.11.09. pp. 46-49. ISBN:978-615-5018-88-6.
- [S18] Ferenczi István: *A programozható logikai vezérlők ciklusidejének mérési módszerei*, Műszaki Tudomány az Északkelet Magyarországi Régióban 2013, Debrecen, Magyarország, 2013.06.04 pp. 299-307. ISBN: 978-963-7064-30-2.
- [S19] Ferenczi István, Vásárhelyi József: *Reaction time measurement of non-synchronized Industrial Ethernet IO device*, Proceedings of the 16th International Carpathian Control Conference, Szilvásvárad, Magyarország, 2015.05.27-2015.05.30. pp. 121-124. ISBN:978-1-4799-7369-9.

**Egyéb kiadványokban megjelent cikkek:**

- [S20] Ferenczi István: *Modeling the behavior of Profinet IRT in Gigabit Ethernet network*, TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 pályázat kiadványa, Miskolc, Magyarország, 2014.04.15 Miskolc-Egyetemváros: Miskolci Egyetem, pp. 41-46.
- [S21] Ferenczi István: *A Profinet IRT ciklusidő meghatározásának módszerei*, Doktoranduszok fóruma: Gépészmérnöki és

Informatikai Kar Szekciókiadványa. Miskolc, Magyarország, 2010.11.10.

- [S22] Ferenczi István: *Nem szinkronizált, kritikus időkapcsolatok elemzése egy Profinet IO rendszernél*, Doktori szemináriumi munkaanyag, Miskolc-Egyetemváros, 2010. június.
- [S23] Ferenczi István: *Beágyazott telegramokat tartalmazó ipari Ethernet keretek ciklusidejének meghatározása*, Doktorandusz szemináriumi munkaanyag, Miskolc-Egyetemváros, 2011.06.

## **TOVÁBBI FELHASZNÁLT SZAKIRODALOM:**

- [1] IEEE 802.3 Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications, 2008.
- [2] Hosszú Gábor: Az internetes kommunikáció alapjai, 2005.
- [3] Ajtonyi István: Ipari kommunikációs rendszerek I., 2008.
- [4] Andrew S. Tanenbaum: Számítógép hálózatok
- [5] RFC 793, Transmission Control Protocol, 1981.
- [6] RFC 768, User Datagram Protocol
- [7] RFC 826, An Ethernet Address Resolution Protocol, 1982.
- [8] RFC 1918, Address allocations for privat Internets, 1996.
- [9] Perry S. Marshal, John Rinaldi: Industrial Ethernet, 2. edition, 2005.
- [10] Petrényi József: TCP/IP alapok, 2009
- [11] Hartványi Tamás, Kovács Sházi Tamás: Számítógép hálózatok, 2001.
- [12] Kovács Szilveszter: A hálózattervezés alapjai, 2007.
- [13] RFC 894, Charles Hornig: A Standard for the Transmission of IP Datagrams over Ethernet Networks, 1984.

- [14] Ajtonyi István: Ipari kommunikációs rendszerek III., 2009.
- [15] Seok-Kyu Kweon, Kang G. Shin: Statical Real-Time communication over Ethernet for Manufacturing Automation Systems, 1999.
- [16] Lucia LoBello, Giordano Kaczynski, Oratio Mirabella: Improving the Real-Time Behavior of Ethernet Networks Using Traffic Smoothing, 2005.
- [17] J. L. Sobrinho, A. S. Krishnakumar: EQuB-Ethernet quality of service using black burst, 2006.
- [18] Q. Zang, W. Zang: Priority Scheduling in Switched Industrial Ethernet, 2005.
- [19] Chitra Venkatramani: The design Implementation and Evaluation of RETHER: Real-Time Ethernet Protocol, PhD dissertation, 1996.
- [20] Chitra Venkatramani, Tzi-cker Chiueh: Design, Implementation, and Evaluation of a Software-based Real-Time Ethernet Protocol, 1995.
- [21] I. L. Badiola, I. Radovanović, G. Russello, M. Chaudron: Design and implementation of a Real-Time protocol over Ethernet, 2004.
- [22] H. Hoang, G. Buttazzo, M. Jonsson, S. Karlsson: Computing the Minimum EDF Feasible Deadline in Periodic Systems, RTCSA 2006.
- [23] Jane W. S. Liu: Real-Time Systems, Prentice Hall 2000
- [24] Tei-Wei Kuo: Introduction to Real-time Process scheduling, National Taiwan University  
<http://www.csie.ntu.edu.tw/~ktw/rts/ch-short-course-uni.pdf>
- [25] C. L. Liu, J. W. Layland: Scheduling algorithm for multiprograming in a Hard Real-time Environments, Journal of ACM, 1973.
- [26] S. K. Baruah, A. K. Mok, L. E. Rosier: Preemptively scheduling Hard Real-Time sporadic task on one processor, IEEE Real-Time System Symposium, 1990.

- [27] Ajtonyi I., Gyuricza I., Programozható irányítóberendezések és hálózatok, 2002.
- [28] Ross Bannatyne: Time Triggered Protocol: TTP/C, Embended System Programming, march 1999.
- [29] B. Müller, T. Führer, F. Hartwich, R. Hugel, H. Weiler, Fault tolerant TTCAN networks,  
<http://www.canopen.org/fileadmin/cia/files/icc/8/mueller.pdf>
- [30] P. Pedreiras, L. Almeida, P. Gai, G. Buttazzo: FTT-Ethernet, a platform to implement the Elastic Task Model over message streams,  
[http://www.iceta.pt/lse/ftt/pub/wfcs02\\_ftt-eth\\_elas\\_task\\_model.pdf](http://www.iceta.pt/lse/ftt/pub/wfcs02_ftt-eth_elas_task_model.pdf)
- [31] Ronald Dietrich: Industrial Ethernet, Harting Electric GmbH, 2004.
- [32] Martin Rostan: Industrial Ethernet Technology, EtherCAT Technology Group, 2011. augusztus.
- [33] Rockwell Automation Publication ENET-RM002A-EN-P, 2011. július.
- [34] Dirk Mohl, IEEE 1588 - Precise Time Synchronization as the Basis for Real Time Applications in Automation, 2004.
- [35] Mark Chaffee, CIP Motion Implementation Considerations, CIP Networks Conference, február 2009.
- [36] Raimond Pigan, Mark Metter: Automating with Profinet (2006)
- [37] PROFINET – Technology and Application, 2006. április.
- [38] PROFINET System Description – Technology and Application, Version June 2011.
- [39] EtherCAT – The Ethernet Fieldbus, 2009, [www.ethercat.org](http://www.ethercat.org)
- [40] EtherCAT Master – Application Developers Manual, Doc. Nr. P.4500.21/Rev. 1.4, 2011.
- [41] EtherCAT Slave Controller Technology, Ver. 1.7 by Backhoff Automation GmbH, 2010.
- [42] Ethernet Powerlink, Perfection in Automation, 2004. [www.br-automation.com](http://www.br-automation.com)



- [43] Ethernet Powerlink Basics, 2011, [www.ethernet-powerlink.org](http://www.ethernet-powerlink.org)
- [44] SERCOS III, by SERCOS International e.V. 2011. [www.sercos.org](http://www.sercos.org)
- [45] Peter Lutz, SERCOS III – Universal Real-Time Communication for Automation, MOF Summit, Tokyo, 2011. november.
- [46] Introduction to Modbus TCP by Acromag Inc. Wixom, USA, 2005. [www.acromag.com/sites/default/files/Acromag\\_Intro\\_ModbusTCP\\_765A.pdf](http://www.acromag.com/sites/default/files/Acromag_Intro_ModbusTCP_765A.pdf)
- [47] Siemens AG, SIEMENS SIMATIC S7-300 CPU 31xC and CPU 31x, Technical Specification manual 2011. március.
- [48] Siemens AG, S7-300 Instruction list manual, Edition 1, 2001.
- [49] National Instruments, NI 622x Specification manual, 2007. június.
- [50] Schneider Magazin, VIII. évfolyam 1. szám, 2008. február.
- [51] Siemens AG, ET200S Distributed IO Interface modul IM151-3PN high features manual, 2009. március.
- [52] Ajtonyi István, PLC és SCADA-HMI rendszerek II. & Ipari kommunikációs rendszerek II. 2008. május.
- [53] International Standard IEC 61131-5, Programmable Controllers Part 5, Communication, Edition 2000.11.
- [54] Siemens AG, Simatic ET200 Distributed IO Digital electronic modul 2DI 24VHF manual, 2007. 04.
- [55] Siemens AG, Programmable Logic Controllers S7-300 Module Data Reference Manual, 2005.
- [56] Dirc S. Mohl, IEEE 1588 - Precise Time Synchronization as the Basis for Real Time Applications in Automation, 2009.
- [57] Jaspersnite J., Schumacher M., Weber K.: Limits of increasing the performance of Industrial Ethernet Protocols, ETFA 2007 Proceedings, p. 17-24.
- [58] [69] Gunnar Prytz, A performance analysis of EtherCAT and Profinet IRT, 13. IEEE International Conference EFTA 2008, pp. 408-415.

- [59] Caleb Gordon, White Paper Introduction to IEEE1588 & Transparent Clocks, [www.tektroninternational.com](http://www.tektroninternational.com), 2009.
- [60] M. Rostan, EteherCAT Introduction, Hannover messe 2008.
- [61] Schneider magazin, VIII. évfolyam, 1. szám, 2008. február.
- [62] Mitsubishi Electric FA, CC Link IE, 07.2008.